

京津冀大气污染联防联控区域细分与等级评价*

薛 俭 陈强强[#]

(陕西科技大学经济与管理学院, 陕西 西安 710021)

摘要 联防联控已成为区域大气污染有效应对战略,确定联防联控的范围和等级是其关键所在。根据各城市污染物长期监控数据,运用相关性分析、线性回归、聚类分析等方法确定联防联控子区域;其次,构建了联防联控子区域大气污染水平、平均人口密度、对区域整体污染的影响程度和污染治理弹性4个等级评价指标,并利用优劣解距离(TOPSIS)-灰色关联综合评价模型对联防联控子区域进行等级评价;最后,把该方法应用到京津冀区域13个城市的PM_{2.5}和O₃污染联防联控的实证案例。结果表明,京津冀区域可划分为4个PM_{2.5}联防联控子区域、6个O₃联防联控子区域,这些联防联控子区域的治理优先等级与实际相符,验证了新方法的科学性和合理性,为全国区域大气污染联防联控提供了决策依据。

关键词 京津冀区域 大气污染 联防联控 子区域 等级 优劣解距离-灰色关联综合评价模型

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2020.10.023

Range and gradation evaluation of air pollution joint prevention and control in Beijing-Tianjin-Hebei region, China XUE Jian, CHEN Qiangqiang. (School of Economics and Management, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an Shaanxi 710021)

Abstract: Regional joint prevention and control has become an effective strategy to deal with regional air pollution with the key point of range and gradation of prevention and control. The long-term pollution monitoring data, correlation analysis, regression analysis, cluster analysis and other methods were used to determine the joint prevention and control sub-region. Secondly, the evaluation index system of sub-region's average air pollution level, sub-region's average population density, sub-region's influence degree on the whole regional pollution and sub-region's potential spatial level of pollution control was constructed, and gradation evaluation of sub-regions was applied based on TOPSIS-grey relational comprehensive simulation model. Finally, the new method was applied to an empirical case of joint prevention and control of PM_{2.5} and O₃ pollution in 13 cities in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China. The results showed that the Beijing-Tianjin-Hebei region could be divided into four PM_{2.5} sub-regions and six O₃ sub-regions. The gradation of the sub-regions was in line with the reality. The scientificity and rationality of the new method were verified, which could provide a decision basis for the regional joint prevention and control of air pollution in China.

Keywords: Beijing-Tianjin-Hebei region; air pollution; joint prevention and control; sub-region; gradation; TOPSIS-grey relational comprehensive simulation model

近年来,我国大气污染已呈现区域性特征^[1],现有的属地治理方式已不能对区域大气污染进行有效治理^[2]。系统整合环境治理资源,严格落实属地责任,建立各部门统一调动的联防联控机制,目前已形成广泛共识^[3-4]。科学确定联防联控的区域范围和治理优先等级成为联防联控有效性的关键^[5]。

目前划分联防联控区域的方法主要有两种:一是按照大气污染自身特点^[6],二是按照生态环境的地理特点(即大气流动规律)^[7]。现有的两种方法都缺乏系统性^[8]。前者将大气污染孤立研究,未能全面考虑

污染地区的自然、经济、社会等综合因素;后者虽然将污染地区影响空气流动的自然因素考虑其中,但忽视了我国行政管理体制的现状。对于京津冀这样大范围的空气污染治理,参与主体多,导致协调困难^[9]。

制定联防联控子区域及划分治理等级的相关研究成果较少,但可借鉴多属性综合评价在其他领域的研究成果。多属性综合评价理论中,优劣解距离(TOPSIS)法被用于城镇污水处理绩效评价^[10]、区域发展模式选择^[11]、城市/行业竞争力比较^[12]、水资源环境评价^[13]、工业污染或环境绩效评价^[14]、项目

第一作者:薛 俭,男,1974年生,博士,教授,研究方向为环境管理。[#] 通讯作者。

* 国家自然科学基金资助项目(No.16BGL146);2020年度陕西省社科界重大理论与现实问题研究项目(No.2020Z412)。

环境风险评价^[15]以及大气污染治理等级评价^[16]。但是, TOPSIS法存在一定的应用局限性:可能会出现与理想点欧式距离更近或与负理想点的欧式距离也更接近的情况,在此情况下的评价结果并不能完全反映出各方案的优劣性。灰色关联分析法常被用于电网规模评价^[17]、环境影响因素评价^[18]、空气污染评价^[19]、水质评价^[20]等方面。然而灰色关联分析法也有不容忽视的不足之处:它只能针对各方案相同因素之间的关联性进行度量,仅仅根据灰色关联分析法来对系统进行优选决策是不准确的。因此本研究结合 TOPSIS法和灰色关联分析法各自优势建立 TOPSIS-灰色关联综合评价模型,使得评价结果更具综合性,可提高系统评价贴切度。该综合评价模型已应用到旅游产业竞争力评价^[21]、建筑业可持续发展评价^[22]、水质评价^[23]、环境承载能力评价^[24]等方面,目前尚无用于区域大气污染联防联控等级评价的案例。

本研究采用一元线性回归、聚类分析、相关性分析等方法划分联防联控子区域范围;然后构建联防联控子区域大气污染水平、平均人口密度、对区域整体污染的影响程度和污染治理弹性4个等级评价指标;接着建立 TOPSIS-灰色关联综合评价模型确定各子区域的污染治理优先等级;最后把新方法应用到我国京津冀区域 PM_{2.5}和 O₃污染联防联控实例中。

1 研究方法

1.1 联防联控子区域划分方法

(1) 区域内的联防联控城市的选择

以区域 Q 内某城市的第 p 种大气污染物浓度为自变量,以区域 Q 的该大气污染物浓度为因变量进行线性回归。设定一个临界值, R² 大于这个临界值则将城市作为区域 Q 内联防联控候选城市之一^[25]。

(2) 任意两城市之间大气污染相关性分析

算出大气污染区域 Q 内任意两城市之间第 p 种大气污染物的皮尔逊相关系数,该系数越接近于 1,则表明这两城市之间的污染相互传输程度越强^[26]。

(3) 联防联控区域划分

基于相关性分析结果,对候选城市进行聚类分析^[27],得到区域 Q 内针对第 p 种污染物的联防联控子区域。

1.2 联防联控子区域等级排名评价指标选择

(1) 大气污染水平

在大气污染区域 Q 内,联防联控子区域 Q_i 的第 p 种污染物日均浓度越大,则它对当地、区域 Q 内

其他联防联控子区域大气污染影响程度越高,越应优于其他联防联控子区域治理^[28]。

(2) 平均人口密度

治理大气污染问题最终的目的是降低大气污染对居民身体健康的伤害。而一个区域人口密度越高,该区域面临的大气污染对身体健康的伤害可能就越大,越应优于其他联防联控子区域治理。

(3) 对区域整体污染的影响程度

以联防联控子区域 Q_i 的第 p 种大气污染物日均浓度数据为自变量,以区域 Q 的第 p 种大气污染物日均浓度为因变量进行线性回归,如果斜率越大,则说明这个子区域对区域 Q 大气污染水平影响越大,越应优于其他联防联控子区域治理。

(4) 污染治理弹性

各联防联控子区域由于经济发展、污染自我净化水平不同,所以其污染治理弹性也不同。因此,将污染治理弹性作为联防联控等级排名评价指标之一。可以用变异系数反映离散程度,变异系数越大,离散程度越高,说明污染治理弹性越大,效果越显著。

1.3 联防联控子区域等级评价模型构建

针对大气污染区域 Q,根据 1.2 节的方法划分为 m 个联防联控子区域,即 $Q = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_m\}$ 。对于任意联防联控子区域 Q_i 的某种污染物的联防联控等级评价指标体系(N)构建 n 个指标,即 $N = \{N_1, N_2, \dots, N_n\}$ 。根据 Q 和 N 构建评价矩阵 X (见表 1)。

表 1 TOPSIS-灰色关联综合评价模型评价矩阵
Table 1 Evaluation matrix of TOPSIS-grey relational comprehensive simulation model

Q	N ₁	N ₂	N ₃	N ₄	...	N _n
Q ₁	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	...	X _{1n}
Q ₂	X ₂₁	X ₂₂	X ₂₃	X ₂₄	...	X _{2n}
...	...	...	...	...	...	...
Q _m	X _{m1}	X _{m2}	X _{m3}	X _{m4}	...	X _{mn}

采用极值处理法标准化评价矩阵,得到第 j 个指标的最优参考序列 $X_j^* = \{X_{1j}^*, X_{2j}^*, \dots, X_{mj}^*\}$ 和最劣参考序列 $X_j^0 = \{X_{1j}^0, X_{2j}^0, \dots, X_{mj}^0\}$,消除指标量纲影响;然后采用熵值法确定指标权重系数 $W = \{W_1, W_2, \dots, W_n\}$;再分别算出评价序列 X_j^* 和 X_j^0 的灰色关联系数 R_j^* 和 R_j^0 ;最后分别根据式(1)至式(3)计算最优灰色关联度(R*)、最劣灰色关联度(R⁰)和灰色关联贴切度(F)。

$$R^* = \sum_{j=1}^n W_j R_j^* \quad (1)$$

$$R^0 = \sum_{j=1}^n W_j R_j^0 \quad (2)$$

表2 京津冀区域各城市之间 $\text{PM}_{2.5}$ 、 O_3 皮尔逊相关系数矩阵¹⁾
Table 2 Pearson correlation coefficient matrix of $\text{PM}_{2.5}$ and O_3 between cities in Beijing-Tianjin-Hebei region

城市	北京	天津	保定	唐山	廊坊	石家庄	秦皇岛	张家口	承德	沧州	邯郸	邢台	衡水
北京		0.851 *	0.896 *	0.853 *	0.939 *	0.763 *	0.786 *	0.843 *	0.878 *	0.793 *	0.749 *	0.801 *	0.810 *
天津	0.789 *		0.894 *	0.921 *	0.903 *	0.811 *	0.852 *	0.731 *	0.747 *	0.926 *	0.785 *	0.783 *	0.883 *
保定	0.729 *	0.803 *		0.876 *	0.920 *	0.876 *	0.840 *	0.786 *	0.788 *	0.899 *	0.859 *	0.877 *	0.890 *
唐山	0.839 *	0.924 *	0.793 *		0.881 *	0.803 *	0.876 *	0.734 *	0.779 *	0.882 *	0.800 *	0.783 *	0.868 *
廊坊	0.830 *	0.908 *	0.826 *	0.894 *		0.783 *	0.806 *	0.768 *	0.810 *	0.854 *	0.806 *	0.832 *	0.871 *
石家庄	0.712 *	0.781 *	0.855 *	0.799 *	0.788 *		0.778 *	0.671 *	0.654 *	0.853 *	0.838 *	0.845 *	0.844 *
秦皇岛	0.753 *	0.798 *	0.674 *	0.837 *	0.791 *	0.633 *		0.728 *	0.759 *	0.843 *	0.769 *	0.767 *	0.804 *
张家口	0.650 *	0.466 *	0.447 *	0.506 *	0.509 *	0.494 *	0.412 *		0.867 *	0.694 *	0.681 *	0.710 *	0.707 *
承德	0.846 *	0.680 *	0.619 *	0.711 *	0.713 *	0.605 *	0.638 *	0.748 *		0.700 *	0.677 *	0.687 *	0.699 *
沧州	0.667 *	0.876 *	0.860 *	0.799 *	0.816 *	0.797 *	0.641 *	0.439 *	0.596 *		0.829 *	0.812 *	0.929 *
邯郸	0.572 *	0.675 *	0.737 *	0.689 *	0.722 *	0.836 *	0.513 *	0.341 *	0.465 *	0.748 *		0.910 *	0.875 *
邢台	0.661 *	0.737 *	0.825 *	0.748 *	0.760 *	0.928 *	0.578 *	0.488 *	0.606 *	0.779 *	0.862 *		0.845 *
衡水	0.621 *	0.735 *	0.791 *	0.702 *	0.733 *	0.780 *	0.534 *	0.481 *	0.626 *	0.842 *	0.791 *	0.858 *	

注:1) 以对角线为界, 对角线下方展示 $\text{PM}_{2.5}$ 皮尔逊相关系数, 对角线上方展示 O_3 皮尔逊相关系数; * 代表在 0.01 显著水平上通过显著性检验(双尾检验)。

$$F = \frac{R^*}{R^* + R^0} \quad (3)$$

如果 F 越接近 1, 说明被评价对象与最优方案越接近, 效果越好。

2 实证分析

根据《2018 中国生态环境状况公报》公布的大气污染重点区域, 京津冀区域包括北京、天津、石家庄、唐山、秦皇岛、衡水、廊坊、邯郸、邢台、保定、张家口、承德、沧州 13 个城市。本研究收集了来自京津冀区域 81 个空气质量监控站的 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 浓度数据, 时间跨度从 2016 年 1 月 1 日到 2018 年 12 月 31 日, 获得的 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 小时平均浓度有效记录总计分别为 212.87 万、212.86 万条。

2.1 联防联控城市的污染物相关性

表 2 为京津冀区域 13 个城市的污染物皮尔逊相关系数矩阵。结果表明, 污染相关系数存在差异, 但任意两个联防联控城市之间的污染相关系数显著。

2.2 划分联防联控子区域

为确定对整个京津冀区域污染影响程度大的城市, 以整个京津冀区域 $\text{PM}_{2.5}$ 、 O_3 质量浓度为因变量 (y , mg/m^3), 以各城市 $\text{PM}_{2.5}$ 、 O_3 质量浓度为自变量 (x , mg/m^3) 进行一元线性回归分析。表 3 以 $\text{PM}_{2.5}$ 为例进行说明。

以 0.7 作为各城市对京津冀区域污染贡献大小的临界值, 如果 $R^2 > 0.7$, 就可将该城市作为京津冀区域 $\text{PM}_{2.5}$ 联防联控候选城市之一。由表 3 可知, 13 个城市中除秦皇岛、张家口、承德外全是京津冀区域 $\text{PM}_{2.5}$ 联防联控的候选城市, 同理得出 13

表3 京津冀区域与各城市 $\text{PM}_{2.5}$ 线性回归结果
Table 3 Linear regression results of $\text{PM}_{2.5}$ between Beijing-Tianjin-Hebei region and the cities

城市	线性回归方程	R^2
北京	$y = 22.562 + 0.657x$	0.715
天津	$y = 10.312 + 0.851x$	0.831
保定	$y = 10.983 + 0.634x$	0.831
唐山	$y = 12.014 + 0.780x$	0.840
廊坊	$y = 19.841 + 0.755x$	0.852
石家庄	$y = 21.701 + 0.506x$	0.856
秦皇岛	$y = 23.859 + 1.000x$	0.598
张家口	$y = 28.029 + 1.319x$	0.330
承德	$y = 18.701 + 1.343x$	0.565
沧州	$y = 6.652 + 0.919x$	0.807
邯郸	$y = 26.130 + 0.534x$	0.710
邢台	$y = 11.388 + 0.671x$	0.828
衡水	$y = 5.189 + 0.740x$	0.750

个城市均为 O_3 联防联控候选城市。

根据任意候选城市之间的皮尔逊相关系数进行聚类分析, 结果如图 1 所示。京津冀区域可划分为 4 个 $\text{PM}_{2.5}$ 联防联控子区域, 分别为 $Q_1 = \{\text{天津, 唐山, 廊坊, 沧州, 北京}\}$, $Q_2 = \{\text{邢台, 衡水, 保定}\}$, $Q_3 = \{\text{邯郸}\}$, $Q_4 = \{\text{石家庄}\}$ 。同理, 可将京津冀区域划分为 6 个 O_3 联防联控子区域, 分别为 $Q_1 = \{\text{邯郸, 邢台, 石家庄}\}$, $Q_2 = \{\text{北京, 廊坊, 保定}\}$, $Q_3 = \{\text{天津, 唐山, 秦皇岛}\}$, $Q_4 = \{\text{沧州, 衡水}\}$, $Q_5 = \{\text{张家口}\}$, $Q_6 = \{\text{承德}\}$ 。

2.3 基于 TOPSIS-灰色关联综合评价模型的等级评价

根据 1.3 节的评价指标, 计算得到 4 个 $\text{PM}_{2.5}$ 联防联控子区域评价指标, 结果如表 4 所示, 同理可计算得到 6 个 O_3 联防联控子区域评价指标。

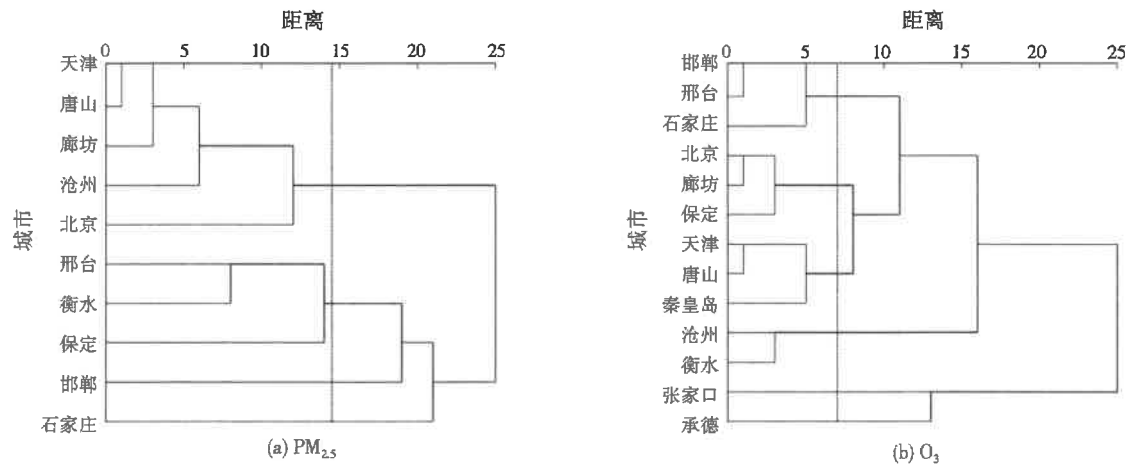


图1 京津冀区域污染候选城市的污染皮尔逊相关系数聚类图

Fig.1 Cluster diagram of pollution Pearson correlation coefficient of candidate cities in Beijing-Tianjin-Hebei region

表4 京津冀区域大气污染4个PM_{2.5}联防联控子区域评价指标

Table 4 Indicators of PM_{2.5} in four sub-regions of PM_{2.5} pollution in Beijing-Tianjin-Hebei region

联防联控子区域	PM _{2.5} 均值/($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	平均人口密度/(人 $\cdot \text{km}^{-2}$)	线性回归方程斜率	变异系数
Q ₁	69.24	899.89	0.902	0.804
Q ₂	87.95	592.33	0.770	0.729
Q ₃	80.46	792.59	0.534	0.952
Q ₄	93.72	680.50	0.634	0.948

运用熵值法计算出每个指标的权重系数。PM_{2.5}联防联控子区域大气污染水平、平均人口密度、对区域整体污染的影响程度和污染治理弹性的权重系数分别为0.316、0.176、0.116、0.391，O₃联防联控子区域这4项指标的权重系数分别为0.247、0.020、0.432、0.301。

PM_{2.5}、O₃联防联控子区域的最优灰色关联度、最劣灰色关联度和灰色关联贴进度如表5所示。4个PM_{2.5}联防联控子区域的优先等级表现为Q₄>Q₁>Q₃>Q₂，6个O₃联防联控子区域的优先等级表现为Q₁>Q₃>Q₂>Q₄>Q₅>Q₆。

表5 最优灰色关联度、最劣灰色关联度和灰色关联贴进度

Table 5 Optimal grey correlation coefficient, worst grey correlation coefficient and grey relevance degree

污染物	联防联控子区域	R ⁺	R ⁰	F	等级
PM _{2.5}	Q ₁	0.803	0.518	0.608	2
	Q ₂	0.460	1.000	0.315	4
	Q ₃	0.678	0.572	0.542	3
	Q ₄	1.000	0.459	0.685	1
O ₃	Q ₁	0.796	0.555	0.589	1
	Q ₂	0.650	0.577	0.530	3
	Q ₃	0.683	0.542	0.557	2
	Q ₄	0.559	0.645	0.464	4
	Q ₅	0.560	0.737	0.432	5
	Q ₆	0.521	0.769	0.404	6

2.4 联防联控子区域分析

由于PM_{2.5}易随风传输并长时间悬浮，因此在

进行PM_{2.5}联防联控时倾向于选择较大的区域范围。在京津冀区域的4个PM_{2.5}联防联控子区域中，Q₁和Q₂所包含的城市较多，Q₃和Q₄所包含的城市较少。由于承德、张家口与其他城市之间有太行山脉阻隔，故传输较少，因此张家口和承德未列入联防联控子区域的范围内，与其地理位置相符。与PM_{2.5}相比，O₃的小范围局地污染特征更加明显，这是由于O₃自身的稳定性较差，容易分解，无法进行较大范围传输。6个O₃联防联控子区域中，Q₄、Q₅和Q₆包含的城市均不超过两个，Q₁、Q₂和Q₃包含的城市也仅有3个。根据O₃小范围污染特征，可将有污染共性的城市在小范围内进行规划协调、联动治理。

以上结果表明，基于相关性分析、一元线性回归和聚类分析划分联防联控子区域，与大气污染物特性、各城市的经济发展水平、地理特征、常驻人口数量等因素相符，具有科学性。

2.5 联防联控子区域治理优先等级评价分析

文章运用TOPSIS-灰色关联综合评价模型对京津冀各联防联控子区域治理等级划分的结果与实际情况相符。PM_{2.5}联防联控子区域中，Q₄的PM_{2.5}污染水平居首且Q₄的污染治理弹性仅次于Q₃，考虑Q₄污染水平最严重，因此Q₄被赋予了最高的PM_{2.5}治理优先等级。Q₁的平均人口密度居首并且其对整个京津冀区域PM_{2.5}污染影响程度最大，此

外 Q_1 是整个京津冀区域政治文化的中心, 因此 Q_1 的 $PM_{2.5}$ 治理优先等级被评定为第二。 Q_3 的污染治理弹性居首, 平均人口密度仅次于 Q_1 , 因此 Q_3 的 $PM_{2.5}$ 治理优先等级为第三。 Q_2 的优先等级最低, 这与 Q_2 污染治理弹性最低且平均人口密度较低的实际情况相符。

同理, O_3 联防联控子区域中, Q_1 由于对整个京津冀区域 O_3 污染影响程度远大于其他联防联控子区域, 因此应最先对 Q_1 进行 O_3 治理, 以最大程度上降低 O_3 污染对整个京津冀区域的影响。而 Q_3 的平均人口密度居首, 有着较大的 O_3 治理紧迫性, 因此 Q_3 的 O_3 治理优先等级排名第二。其他 4 个联防联控子区域综合其 O_3 浓度、 O_3 污染影响程度、 O_3 治理弹性和平均人口密度可得到相应的治理等级。

以上分析表明, 综合考虑各联防联控子区域污染水平、平均人口密度、治理弹性、对整个区域污染的影响程度等多个特征, 基于 TOPSIS-灰色关联综合评价模型进行联防联控等级划分的结果与实际情况吻合, 具有科学性和合理性。这种联防联控子区域划分与等级评价有利于提高空气质量、缩减经费开支, 对我国大气污染联防联控具有重要的战略意义。

3 结 语

本研究采用相关性分析、一元线性回归、聚类分析进行联防联控子区域划分; 然后在构建联防联控子区域大气污染水平、平均人口密度、子区域对区域整体污染的影响程度和污染治理弹性 4 个等级评价指标的基础上, 提出采用 TOPSIS-灰色关联综合评价模型划分联防联控等级的新方法; 最后, 对 2016—2018 年我国京津冀区域 13 个城市 $PM_{2.5}$ 和 O_3 污染联防联控进行实证研究。结果表明, 京津冀区域可被细分为 4 个 $PM_{2.5}$ 联防联控子区域, 即 $Q_1 = \{\text{天津, 唐山, 廊坊, 沧州, 北京}\}$, $Q_2 = \{\text{邢台, 衡水, 保定}\}$, $Q_3 = \{\text{邯郸}\}$, $Q_4 = \{\text{石家庄}\}$; 6 个 O_3 联防联控子区域, 即 $Q_1 = \{\text{邯郸, 邢台, 石家庄}\}$, $Q_2 = \{\text{北京, 廊坊, 保定}\}$, $Q_3 = \{\text{天津, 唐山, 秦皇岛}\}$, $Q_4 = \{\text{沧州, 衡水}\}$, $Q_5 = \{\text{张家口}\}$, $Q_6 = \{\text{承德}\}$ 。4 个 $PM_{2.5}$ 联防联控子区域的优先等级表现为 $Q_4 > Q_1 > Q_3 > Q_2$, 6 个 O_3 联防联控子区域的优先等级表现为 $Q_1 > Q_3 > Q_2 > Q_4 > Q_5 > Q_6$ 。京津冀区域 $PM_{2.5}$ 和 O_3 联防联控子区域划分和等级评价与其自身经济发展水平、自然条件、人口现状等实际情况相符, 说明本研究提出的联防联控子区域划分与等级评价方法具有一定科学性。

参考文献:

- [1] YANG N, JI D G, LI S J. The application of Pearson correlation analysis method in air quality analysis of Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Agricultural Science & Technology, 2015, 16(3): 590-592.
- [2] 李云燕, 王立华, 殷晨曦. 大气重污染预警区域联防联控协作体系构建——以京津冀地区为例[J]. 中国环境管理, 2018, 10(2): 38-44.
- [3] 柴发合, 云雅如, 王淑兰. 关于我国落实区域大气联防联控机制的深度思考[J]. 环境与可持续发展, 2013, 38(4): 5-9.
- [4] WU D, XU Y, ZHANG S Q. Will joint regional air pollution control be more cost-effective? An empirical study of China's Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Journal of Environmental Management, 2015, 149: 27-36.
- [5] 丁峰, 张阳, 李鱼. 京津冀大气污染现状及防治方向探讨[J]. 环境保护, 2014, 42(21): 55-57.
- [6] 王金南, 宁森, 孙亚梅. 区域大气污染联防联控的理论与方法分析[J]. 环境与可持续发展, 2012, 37(5): 5-10.
- [7] 杨金田. 区域大气污染联防联控重点何在[N]. 中国环境报, 2011-05-25(2).
- [8] TONG P F, ZHANG Q R, LIN H M, et al. Simulation of the impact of the emergency control measures on the reduction of air pollutants: a case study of APEC blue[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2020, 192(2): 116.
- [9] 薛俭. 我国大气污染治理省际联防联控机制研究[D]. 上海: 上海大学, 2013.
- [10] 关翌, 李伟伟, 韩海坤. 基于熵权 TOPSIS 法的城镇污水处理绩效评价[J]. 人民长江, 2019, 50(6): 20-24.
- [11] 程钰, 任建兰, 崔昊, 等. 基于熵权 TOPSIS 法和三维结构下的区域发展模式——以山东省为例[J]. 经济地理, 2012, 32(6): 27-31.
- [12] 王刚, 陈伟, 曹秋红. 基于 Entropy-Topsis 的林业产业竞争力测度[J]. 统计与决策, 2019, 35(18): 55-58.
- [13] 苏建云, 黄耀裔, 李子蓉. 基于因子分析的 TOPSIS 法改进对浅层地下水综合评价[J]. 节水灌溉, 2016(1): 50-54.
- [14] 张爱美, 董雅静, 吴卫红, 等. 基于复合权重-TOPSIS 法的我国化工企业环境绩效评价研究[J]. 科技管理研究, 2014, 34(18): 48-52.
- [15] 史哲齐. 基于 TOPSIS-层次分析法石油化工企业环境风险评估研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2019.
- [16] XIE Y J, ZHAO L J, XUE J, et al. Methods for defining the scopes and priorities for joint prevention and control of air pollution regions based on data-mining technologies[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 185: 912-921.
- [17] 宋新甫, 徐龙秀, 张艳, 等. 结合灰色关联分析的熵权 VIKOR 法输电网规划方案综合评价方法[J]. 电工技术, 2019(11): 11-14.
- [18] ZHAO G F, HUO Y J, ZHANG Z F, et al. Analysis of key environmental impact factors based on fuzzy clustering and Grey T's correlation degree method[J]. Materials Science and Engineering, 2019, 472: 1-8.
- [19] 马宇晓. 加权灰色关联分析法在空气污染评价中的应用[J]. 中国战略新兴产业, 2018(4): 79.
- [20] 秦聪. 基于改进灰色关联分析法的汾河水质评价[J]. 水利水电快报, 2019, 40(5): 35-38.

(下转第 1314 页)

